基于 ERP 的预测性句子加工研究前沿*

哈尔滨工业大学　岳金星

哈尔滨工业大学(威海)　卜玉伟

哈尔滨工业大学　李佳音

提要：本文梳理了使用事件相关电位(ERP)技术研究人脑进行预测性句子加工所取得的主要成果和重要突破。以心理语言学对句子预测的研究逻辑为切入点，回顾并分析 N400 和前侧正波(frontal positivity)两个 ERP 效应如何揭示词形预测和语义预测这两个预测性句子加工主要操作的研究里程碑，进而总结勾勒出预测性句子加工理论模型。最后，本文指出了现有研究的局限性和未来该课题潜在的研究方向。

关键词：句子理解；预测；N400；前侧正波；事件相关电位(ERP)

[中图分类号]　　[文献标识码]　　[文章编号]

ERP Evidence of Predictive Sentence Processes

YUE Jinxing　Harbin Institute of Technology

BU Yuwei　Harbin Institute of Technology at Weihai

LI Jiayin　Harbin Institute of Technology

Abstract: This paper reviews the primary findings and breakthroughs of the study on predictive sentence processing by using event-related potentials (ERPs). Our review begins with introducing the rationale of sentence prediction in psycholinguistics. Then, the paper surveys the milestones that revealed the associations between two major predictive processes and their ERP correlates: N400 and frontal positivity effects. A model of predictive sentence processing is concluded based on previous studies. Finally, the paper proposes the limitations of the existing studies and possible directions for further research in the future.

Key words: sentence comprehension；prediction；N400；frontal positivity；event-related potential(ERP)

* 本文系国家哲学社会科学基金青年项目"神经语言学视角下的外语学能评估研究"(16CYY024)的阶段性成果，本研究还受到中央高校基本科研业务费专项基金(30620170070)资助。感谢 Roelien Bastiaanse 教授、Olga Dragoy 博士对本研究的建议与指导，感谢匿名评审给出的宝贵意见。谨以此文向已故的哈尔滨工业大学马林教授、已故的荷兰格罗宁根大学 Laurie Stowe 教授致敬。

1. 引言

在语言信息传递的过程中，一个句子中的成分词遵循特定的顺序，呈线性进入认知系统。然而，句子理解系统似乎并非被动地加工输入词，而是可以结合语境，动态地对句子接续词(sentence continuation)[1]开展自上而下的加工。例如，在给定英语语境“The child was born with a rare …”中，接续输入“disease”或者“gift”都能使整个句子通顺，但是“disease”这一接续词似乎更加符合某种预期(Federmeier et al. 2007)。然而，这种发生在句子理解中的“预期”究竟涉及何种语言认知操作，却成为了困扰心理语言学家的一个难点。近年来，通过使用具有极高时间分辨率的事件相关电位(Event-related potential, ERP)技术以及巧妙的实验设计，研究人员不但确认句子理解系统能够高效利用语境提供的线索，对即将出现的接续词作出具体的“预测”(Federmeier 2007; DeLong et al. 2011; Van Petten & Luka 2012)，同时也发现，“预测”会引发对特定接续词的期待，进而影响句子理解系统对符合或不符合预测结果的实际输入词的在线加工，此类加工即被称为预测性句子加工[2](Kaan, 2014)。本文重点回顾已有 ERP 研究对“句子理解中是否存在预测”以及“预测性句子加工的认知内涵”两个基本问题的探讨，进而总结预测性句子加工理论框架，并讨论已有研究的不足以探索进一步研究的方向。

2. 基于 ERP 的句子加工研究背景

在过去三十多年中，ERP 技术使得在线监测句子理解这一高级人脑认知活动成为可能。在众多与语言加工相关的 ERP 成分中，最为稳定的莫过于 N400 和 P600。N400 是一个负走向的脑波，多在输入词刺激开始后约 400ms 为中心、跨度为 200ms 的时间窗口中观察到，被广泛认为与语义加工相关(Kutas & Federmeier 2011；Kutas & Hillyard 1980，1984)。当输入词造成句法不通畅时，在刺激开始后约 600ms 会呈现出一个正走向的慢电位，即 P600，被证明与句法加工困难有关(Gouvea et al. 2010; Hagoort et al. 1993; Kaan et al. 2000; Osterhout & Holcomb 1992)。此外，在阅读条件下，N400 和 P600 的典型头皮分布均为中央顶区域。

基于 N400 和 P600 两个神经生理指标，以 Friederci(2002)和 Hagoort & Van Berkum (2007)等为代表的主流句子加工理论普遍围绕 “语义-句法”二分的基本构架展开(Van Petten & Luka, 2012)，该理论认为句子加工本质上是通过将成分词的语义(概念)和句法(结构)两个维

[1] 接续词/连续词(sentence continuation)指句子展开时，不断进入感知系统的各个成分词。
[2] 尽管已有文献经常将此类加工粗略的称为预测性加工(predictive processing)或预测性语言加工(predictive linguistic processing)，但是本文中所探讨绝大多数研究所用实验均在句子条件下开展，因此本文参照 Kaan (2014)将此类认知活动命名为预测性句子加工。

度的信息整合进语境而实现的。具体来说，为了理解一个句子，分词系统(parser)对一个输入接续词的语义和句法信息进行解码后，会将其同不断累积的语境进行整合。根据 N400 和 P600 彼此分离的时间特征，此类理论还认为语义加工的时间进程早于句法加工，而且二者是相互独立的认知机制，分步顺序展开(Frisch et al. 2004)。

然而，句子理解系统似乎不仅仅是将接续词的语义和句法特征"整合"进动态增长的语境信息中，而是能够基于语境预测出一个具体的候选词。检验句子预测是否存在需要两类句子加工证据：第一，成功预测带来的接续词加工的易化效应(facilitation)；第二，不成功预测造成的额外的认知加工代价(DeLong et al. 2011; Van Petten & Luka 2012)。随着句子认知加工和人脑 ERP 关联的逐步建立，ERP 技术被迅速引入对句子预测的探索中。研究人员利用 ERP 超高的时间分辨率和对认知加工的高敏感度，突破了传统行为实验方法的限制，相继发现了在预测成功和失败两种情况下，支持预测性句子加工存在的电生理证据，推动句子理解理论的调整。以下分别介绍成功预测和不成功预测两种情况所对应的 ERP 效应，并分析预测性句子加工的认知内涵。

3. 成功的句子预测与 N400

大量研究通过比较加工高预测度句子接续词和低预测度接续词时 ERP 的变化发现，一个接续词所激发出 N400 的大小和这个接续词的可预测度[3]负相关(Kutas & Hillyard 1984; Federmeier et al. 2007; Thornhill & Van Petten 2012; DeLong et al. 2014; Ito et al. 2016)。即接续词的可预测度越高，N400 的强度越小。由于更显著的 N400 效应往往对应更大的语义加工难度，N400 和预测度的负相关性暗示了预测性句子加工所带来的语义加工的易化效应。

更进一步的证据表明，N400 和接续词预测度之间的相关性是由预测具体的候选词造成的。一方面，研究人员比较了在不同语境约束(contextual constraint)强度下，具有不同预测度接续词的语义加工情况(Kutas & Hillyard 1984; Federmeier et al. 2007; Thornhill & Van Petten 2012)。语境约束强度是度量特定语境下可以使句子通顺的接续词数量的心理语言学指标——语境约束越强，则该句子框架可接受的候选接续词数量越少。例如，当读到"Mary went to her room to look at her …"时，尽管多数人会填写"clothes" (Federmeier et al. 2007)，但是也会有少数人填写"gift"、"sister"、"toy"等其他五花八门的接续词，说明上述句子框架的语境约束弱。ERP 数据提示，不论句子框架所提供的语境约束高低与否，预测度低的接续词较

[3] 一个句子接续词的预测度由这个词在该句子框架中出现的完型概率(Cloze probability)表示。计算方法是，对一个句子的结尾词进行完形填空时，一个词被用来作为答案的概率，即该词的使用数占所有各种答案总数的比例(例如，"The child was born with a rare disease / gift"中，"disease"为高预测度接续词，"gift"为低预测度接续词)(Federmeier et al. 2007)。

之预测度高的句尾接续词(sentence completion)均激发出更大的 N400，且低预测度句尾接续词激发的 N400 在不同约束强度语境中无显著性差别。此类结果提示，人脑并非预先激活一切跟语境相关的语义表征，而是可以基于语境，对最有可能出现的句子接续词进行精准、具体的预测(Federmeier et al. 2007; Thornhill & Van Petten 2012)。

另一方面，如果句子理解系统能够预测出一个具体的候选词，那么这个候选词所携带的语义概念的激活必然影响实际接续词的语义加工。根据这一假设，研究人员设计了语义相关违例范式(related anomaly paradigm)。起初，"语义自动激活"(Kutas & Van Petten 1988；Brown & Hagoort 1993)等类似理论认为句子理解过程中所有跟语境有关的语义会被自动激活，从而影响接续词的语义加工。也就是说，语境"激活"的语义对不同违例词的加工造成的影响应该是均等的，并不存在加工难度的差别。然而后期研究发现，在特定语境下，即使几类违例词均同语境无关，人脑对其中与预期候选词意义联系更紧密的一类违例词的语义加工的难度更低，与预期词同类的违例词所诱发的 N400 显著小于不同类违例词所引发的电反应(Federmeier & Kutas 1999; Ito et al. 2016)。

综上所述，N400 和接续词预测度之间的负相关性是由预测具体接续词造成的，且这一认知过程激活了预测词对应的概念表征，从而易化了对成功预测的输入词以及语义上有关联的违例词的语义加工。由此可见，在预测性句子加工中，N400 能够反映概念语义的预测性加工。

4. 不成功预测与前侧正波

在揭示成功预测和 N400 之间关联的同时，研究还发现，当实际输入的接续词与高预测度候选词并不匹配，但依然能使句子通顺时，此类刺激往往诱发一个正走向的 ERP 效应，潜伏期约为 400-600ms，并可一直延续到 900-1200ms，分布在头皮前侧电极(Coulson & Van Petten 2007; DeLong et al. 2011, 2012, 2014; Federmeier et al. 2007; Ito et al. 2016; Rommers & Federmeier 2018; Kutas 1993; Thornhill & Van Petten 2012; Wicha et al. 2004; Van Berkum et al. 2005)，呈一定的左脑半球偏侧化(DeLong et al. 2011；DeLong & Kutas 2016; Rommers & Federmeier 2018)。由于 ERP 中的晚期正波往往同额外的认知代价有关，因此前侧正成分最早被认为由预测失败所触发的对预期的修正引起(Kutas 1993)。其后，Federmeier et al. (2007) 明确报告了不成功预测所引发的潜伏期开始于 500ms 的正向慢电位，并命名为前侧正波(frontal positivity)。由于前侧正波多在 N400 峰值之后约 100ms 的时间窗口被观察到，亦被称为"后 N400 正波"(Post-N400 Positivity, 简称 PNP，Van Petten & Luka 2012: 183)。

已有研究从两个方面揭示了预测失败所引发的前侧正波同词形预测之间存在关联。一方面，非预期的输入词所诱发的前侧正波似乎不受语境语义影响(Federmeier et al. 2007; Thornhill & Van Petten 2012)。Thornhill & Van Petten(2012)比较了在高语境约束和低语境约束的情况下，大脑对预期词、同预期词语义相关的低预期词、同预期词语义无关的低预期词的电反应。例如，高语境约束句子：“He was afraid that doing drugs would damage his brain / mind / reputation.”；低语境约束句子: “Penelope started to assemble her new bicycle but was missing the wheels / tires / instructions.”，其中下划线词分别对应上述三种接续词。实验结果表明，尽管同预期词语义相关的低预期词所激发出的 N400 效应小于同预期词语义无关的低预期词，这种语义概念相关性却并不影响它们诱发的前侧正波的大小，而且，低预期接续词引发的前侧正波对语境约束强度不敏感。

另一方面，研究人员利用不同语言中丰富的形态-句法(morpho-syntactic)规则(如英语中不定冠词 a/an 对接续名词首字母的形态约束)巧妙地设计出与预期候选词在形态上的要求存在冲突的实验材料，同样发现了稳定的前侧正波效应(DeLong et al. 2011；Van Berkum et al. 2005；Wicha et al. 2004)。因而得知，当实际输入接续词形态与预期不一致时，输入词会诱发前侧正波，反映出句子理解系统能够对预测词的词形乃至相关形态要求进行在线核查，并在预测失败时调用额外的认知资源修正先前的预测。

此外，近年来出现了对预测失败的高预期候选词的进一步研究。例如 Nessa & Asschera (2018)发现，当高预期候选词预测失败后，前侧正波揭示人脑对候选词的预期产生抑制作用，从而影响其整合实际输入的、通畅的接续词。而不通畅的表达则不会诱发抑制候选词所对应的前侧正波。另外，Rommers & Federmeier (2018)将实验材料由单句扩展为由几句话组成的一段话，在后文再次呈现前文预测失败的候选词，并发现在特定语境中再现的预期候选词会诱发更强的 N400。

5. 预测性句子加工机制

以上 ERP 研究直观地揭示了句子理解过程中存在对即将出现的具体接续词的预测。这种预测的认知机制的核心内涵是对接续词在语义概念和词两个维度上开展预测。具体来说，句子理解系统能够根据语境针对即将到来的接续词展开预测，生成一个专门的候选词。预测词所携带的语义概念和词形均提前被激活，并影响对实际输入词的认知加工。句子理解将从成功的预测中获利，表现为加工高预测度接续词对应的更小波幅的 N400 效应，提示较之低预测度接续词，人脑加工预期接续词的概念意义难度更低。而不成功的预测则在引发更强的 N400 的同时，还诱发显著的前侧正波效应，提示句子理解系统对预期词词形维度的预测，其中可能涉及如下具体操作：句子理解系统首先通过与预期词的词形进行比较核查实际输入

词的词形，当其与预期词的词形(或形态)不匹配时，句子理解系统需要付出的额外的认知加工代价，抑制提前激活的预测词词形，从而实现对非预期输入词的加工。

ERP 数据展现出的时间信息还清晰地表明，预测性句子加工在时间进程上呈现分步开始、部分重叠的特征。具体表现为，实际输入接续词在刺激发生后以 400ms 为中心前后跨度约 200ms 的时间窗口中(即 N400 时间窗口)激发预测性语义概念加工。而词形预测造成的影响开始于接续词出现后约 400ms，并在约 500-600ms 达到活动强度的顶峰。这一时间窗口恰巧处于语义加工 N400 和句法加工 P600 之间，因此可以认为预测性词形加工在语义加工开始后、句法相关加工开始前展开。前侧正波与 N400 不同的头皮分布进一步表明了预测性词形加工与概念语义加工虽然彼此分离，但是可以并行运作。

预测性句子加工的 ERP 研究极大地丰富了句子理解理论体系。首先，预测理论勾勒出语义预测和词形预测这两个语言认知计算机制，细化了传统的语言信息“整合”认知操作，并同 N400 和前侧正波两个 ERP 效应对应起来，使我们在更微观的尺度上进一步了解了语言认知系统的构造。第二，应用 ERP 技术所揭示的时间进程暗示了预测性句子加工的展开并非以传统理论所述的分步的方式进行(Friederici 2002; Friederici & Weissenborn 2007)，而是以分步与并行相结合的模式运作的，从而更好地刻画了句子理解过程的动态结构。第三，预测性句子加工理论更进一步诠释了语境信息是如何在意义-形式这两个语言学维度上约束句子理解过程的。具体地说，语境为不断展开的句子理解提供各种线索，并引发对具体接续词的预测，预测的内容包含候选词的词形信息和全部语义信息，从而满足来自语境的约束要求。

6. 现有研究的局限性

已有的预测性句子加工 ERP 研究的局限性表现在对该加工的语言学解释、模态普适性、诱发预测相关 ERP 的条件、应用性研究等四个方面。首先，尽管已有的 ERP 研究成功分离出了同语义预测和词形预测相关的脑电效应，从而揭示了预测加工的认知属性，但是这两方面讨论并不充分，所研究的句子框架较为单一，与实际生活中出现的丰富的句子结构不能完全匹配，然而只有少数研究关注到了这一问题。如 Freunberger & Roehm (2016)发现句子中的副词作为修饰成分所携带的语义概念也会影响实际接续词的语义加工，而且高语境约束下接续词激发的电反应更强。这一结果对“接续词所激发出 N400 的大小和这个接续词的可预测度呈负相关”的理论假设对解释语言实际加工中的认知机制提出了挑战。除此之外，现有研究对预测性句子加工中所依赖的语言加工的细节也涉及甚少。预测性加工对语义、形态等信息敏感，而且其对应的电生理反应与预期外的或新颖的非语言物理刺激所诱发的脑电反应

明显不同，表现出语言特异性。因此，我们提出，语境之所以能够对句子接续词的语义和词形开展预测，是由特定语境下句法-语义接口的结构决定的(Hackl, 2013)。更进一步说，不断累积的语境信息的输入向句子理解系统提供了当前句子可能要呈现的论元结构、短语结构等构式需求，以及与完整诠释当前构式意义最匹配的词汇词义需求(Goldberg 2003)。一个语境中的高预期词能够从形式和意义上最好地满足以上需求，从而被提前激活。更进一步的研究需要首先明确构式中的句法-语义接口是预测性句子加工的语言学动力，然后考察当不同大小尺度的构式组合在一起形成句子时，这些构式的约束是如何彼此协调影响句子预测的。

其次，揭示预测性句子加工机制的 ERP 研究几乎全部使用了阅读范式，这不免让人对相关成果的普适性产生疑问(Van Petten & Luka 2012)。普遍认为，视觉和听觉模态下的句子理解基于相同的句子加工认知机制(Kuperberg 2007)，然而由于句子阅读实验范式与日常句子阅读存在很大差异，往往以固定的速率和间隔逐词呈现刺激，这导致了阅读范式中发现的 ERP 效应也有可能是由于实验任务的独特性引起的。目前，已经有零星研究报告了听觉句子理解中同样存在预测性加工(Boudewyn et al., 2015; Freunberger & Nieuwland, 2016; Drake & Corley, 2015)。例如，Boudewyn et al. (2015)发现了不同预期度的听觉接续词同样引发呈梯度差异的 N400 反应，而且只有在高预测性语境下，预测失败才会引发前侧正波效应。

第三，与预测性句子加工相关的 ERP 效应的触发条件仍缺乏系统考察。尽管最近有观点提出(Kuperburg & Jaeger 2016)，句子理解其实质就是建立在对不同尺度的语言表征进行预测性激活的基础上的。但不得不承认的是，预测性加工作为对语境信息依赖的认知活动，必然需要一定的条件才能触发。例如，Ito et al. (2016)发现刺激启始间隔(SOA)的长短影响影响预测相关的 N400 的表现。研究结果表明，在预测性句子环境下，当 SOA 较长时(700 ms)，与预期词语义或词形相关的接续词诱发的 N400 反应均弱于无关接续词，而在短 SOA(500 ms)的条件中，仅在与预期词语义相关的接续词中发现了减弱的 N400 效应。这些发现暗示预测性句子加工的模式受到接续词输入方式的影响。另一方面，在回顾已有研究的基础上，研究人员总结出只有确保句子通顺的低预测度接续词才能诱发前侧正波(Thornhill & Van Petten 2012；DeLong et al. 2014; Rommers & Federmeier 2018)，而如果句子接续词造成语法错误，则更可能引发 P600 效应(Van Petten & Luka 2012)。这无疑和预测性加工研究者所主张的“词形预测是一个独立的认知机制”的观点相互矛盾。因为，如果预测性加工是一个稳定的机制，则只要出现词形预测失败，就应该能够观察到前侧正波。另外，由于造成句法违例的接续词往往诱发 P600，缺少同时考察 P600 和前侧正波两个晚期正波的文献，因此，预测性词形加工同句法相关加工的关系尚不明确，使得现有研究对前侧正波的认知解释缺少充分的支撑。

除此之外，现有研究均将观察预测性句子加工相关 ERP 的关键词设置在了句尾，而缺少对于不同句子位置的接续词的比较。因此，如何稳定地诱发与预测性句子加工的 ERP 效应已经成为了未来研究必须解答的问题。

最后，加强鉴别不同年龄、健康状况和语言背景人群中的句子预测性加工这一认知功能的特征显得尤为必要。例如，DeLong et al. (2011)率先比较了自然衰老群体中语言流利群体和不流利群体之间，句子理解中高、低预测度接续实词以及该实词之前的冠词引发的 ERP 反应。研究发现，与年轻受试组相似，衰老群体中的接续实词诱发的 N400 效应对预测度敏感，而且，语言流利的老年人组呈现出比年轻人组波幅更显著、潜伏期更长的前侧正波。然而，与年轻人组不同，老年人组脑电反应对同高预期的接续实词形态不一致的冠词不敏感。上述结果清晰表明，自然衰老群体的句子理解机制依然具备一定的概念和词形预测功能，然而这一功能仅局限在实词，而且预测失败时需要消耗更多的认知资源修正词形预测。Chang et al. (2016)则更进一步发现了预测性加工的 ERP 效应同老年失语症群体阅读能力具有相关性，提示了句子预测及其对应的电生理指标具有潜在的临床应用价值。

尽管目前鲜见应用 ERP 开展二语/外语句子预测的研究，但 Moreno et al. (2002)开展的实验揭示了二语中也存在预测性句子加工的证据。通过比较英语、西班牙语双语者语码转换时的 ERP 反应，研究者发现在英语句子阅读中，受试没有读到高预期英语词或意外出现高预期词的西班牙语对等词时，均会激发更大的 N400 效应，同时伴随前侧正波效应。这些结果提示，一语的概念和词形预测机制可以扩展到二语加工系统。然而这项研究的对象是语码转化中的加工机制，并非严格意义上的二语/外语句子理解。另外，如果预测性句子加工是专门的语言水平上的认知机制，那么这种机制是否与语言/外语学能(Wen et al. 2017；温植胜 2005)这一因人而异的天赋能力存在关联呢？因此直接针对非一语句子理解中的预测性加工研究亟待开展。

7. 结语

一系列应用 ERP 的实验提示，人脑具备在“输入”发生之前就根据已有语境信息对即将到来的“输入”进行预测的认知机制，而且这种预测发生在语义概念和词形两个维度上，分别对应 N400 和前侧正波效应。预测性加工的有关研究成果促使心理语言学学者进一步完善传统上基于“语义-句法”二分的标准理论，通过细分概念预测和添加词形预测等认知机制，更全面地揭示一系列认知加工如何以分步和并行混合的方式展开，实现句子理解。进一步的研究可以就预测性句子加工的语言学意义、预测机制的模态普适性、诱发条件、不同生理状况

和语言背景群体中的预测性句子加工模式进行探索。总之，运用 ERP 技术开展预测性句子加工目前已经取得了瞩目的成果，进一步的研究必将会产生更加具有突破性的新发现。

References [参考文献]:

Boudewyn, M. A., D. L. Long & T. Y. Swaab. 2015. Graded expectations: predictive processing and the adjustment of expectations during spoken language comprehension. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* 15: 607-624.

Brown, C. & P. Hagoort. 1993. The processing nature of the N400: Evidence from masked priming. *Journal of Cognitive Neuroscience* 5: 34-44.

Chang, C.T., C.Y. Lee, C. J. Chou, J. L. Fuh & H. C. Wu. 2016. Predictability effect on N400 reflects the severity of reading comprehension deficits in aphasia. *Neuropsychologia* 81: 117–128.

Coulson, S. & C. Van Petten. 2007. A special role for the right hemisphere in metaphor comprehension: An ERP Study. *Brain Research* 1146: 128-145.

Drake, E. & M. Corley. 2015. Articulatory imaging implicates prediction during spoken language comprehension. *Memory & Cognition* 43: 1136-1147.

DeLong, K. A., T. P. Urbach & M. Kutas. 2005. Probabilistic word pre-activation during language comprehension inferred from electrical brain activity. *Nature Neuroscience* 8: 1117–1121.

DeLong, K.A., T. P. Urbach, D. M. Groppe & M. Kutas. 2011. Overlapping dual ERP responses to low cloze probability sentence continuations. *Psychophysiology* 48: 1203-1207.

DeLong, K.A., D. M. Groppe, T. P. Urbach & M. Kutas. 2012. Thinking ahead or not? Natural aging and anticipation during reading . *Brain and Language* 121: 226-239.

DeLong, K.A., L. Quante & M. Kutas. 2014. Predictability, plausibility, and two late ERP positivities during written sentence comprehension. *Neuropsychologia* 61:150–162

DeLong, K. A. & M. Kutas. 2016. Hemispheric differences and similarities in comprehending more and less predictable sentences. *Neuropsychologia* 91: 380–393

Federmeier, K.D. & M. Kutas. 1999. A rose by any other name: Long-term memory structure and sentence processing. *Journal of Memory and Language* 41: 469-495.

Federmeier, K. D. 2007. Thinking ahead: The role and roots of prediction in language comprehension. *Psychophysiology* 44: 491-505.

Federmeier, K. D., E.W. Wlotko, E. De Ochoa-Dewald, & M. Kutas. 2007. Multiple effects of sentential constraint on word processing. *Brain Research* 1146: 75-84.

Freunberger, D. & M. S. Nieuwland. 2016. Incremental comprehension of spoken quantifier sentences: evidence from brain potentials. *Brain Research* 1646: 475-481.

Freunberger, D. & Roehm, D. 2016. Semantic prediction in language comprehension: evidence from brain potentials. *Language, cognition and neuroscience* 31: 1193-1205.

Friederici, A. D. 2002. Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Science* 6, 78-84.

Friederici, A. D. & Y. Weissenborn. 2007. Mapping sentence form onto meaning: The syntax-semantic interface. *Brain Research* 1146: 50-58.

Frisch, S., A. Hahne & A.D. Friederici. 2004. Word category and verb-argument structure information in the dynamics of parsing. *Cognition* 91: 191–219.

Goldberg, A. E. 2003. Constructions: A new theoretical approach to language. *Trends in Cognitive Sciences* 7: 219-224.

Gouvea, A. C., C. Phillips, N. Kazanina, & D. Poeppel. 2010. The linguistic processes underlying the P600. *Language and Cognitive Processes* 25: 149-188.

Hackl, M. (2013). The syntax-semantics interface. *Lingua*, 130: 66-87.

Hagoort, P. & J. Van Berkum, 2007. Beyond the sentence given. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 362: 801-811.

Hagoort, P., C. Brown, & J. Groothusen, 1993. The syntactic positive shift as an ERP measure of syntactic processing. *Language and Cognitive Processe* 8: 439-483.

Ito, A., M. Corley, M. J. Pickering, A. E. Martin & M. S. Nieuwland. 2016. Predicting form and meaning: evidence from brain potentials. *Journal of Memory & Language 86*: 157-171.

Kaan, E. (2014). Predictive sentence processing in L2 and L1: What is different?. Ling*uistic Approaches to Bilingualism 4*： 257-282.

Kaan, E., A. Harris, E. Gibson, & P. Holcomb. 2000. The P600 as an index of syntactic integration difficulty. *Language and Cognitive Processes* 15: 159-201.

Kuperberg, G. R. 2007. Neural mechanisms of language comprehension: Challenges to syntax. *Brain Research* 1146: 23-49.

Kuperberg, G. R. & T. F. Jaeger. 2016. What do we mean by prediction in language comprehension?. *Language, Cognition and Neuroscience* 31: 1-28.

Kutas, M. & S. A. Hillyard, 1980. Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 207: 203-208.

Kutas, M. & S.A. Hillyard, 1984. Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature* 307:161-163.

Kutas, M. & C. Van Petten. 1988. Event-related brain potential studies of language. In P. Ackles, J. R. Jennings, & M. G. H. Coles(eds.). *Advances in Psychophysiology*. Greenwich: JAI Press, 139-187.

Kutas, M. 1993. In the company of other words: Electrophysiological evidence for single word and sentence context effects. *Language and Cognitive Processes* 8:533-572.

Kutas, M. & K. D. Federmeier, 2011. Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology* 62: 621-647.

Kutas, M., K. A. DeLong & N. J. Smith. 2011. A look around at what lies ahead: Prediction and predictability in language processing. In M. Bar(ed.). *Predictions in the Brain: Using Our Past to Generate a Future*. Oxford: Oxford University Press, 190-207.

Moreno, E. M., K. D. Federmeier, & M. Kutas. 2002. Switching languages, switching Palabras (words): An electrophysiological study of code switching. *Brain & Language* 80: 188–207.

Osterhout, L. & P. J. Holcomb. 1992. Event-related potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language* 31: 785-806.

Rommers, J. & Federmeier, K. D. (2018). Lingering expectations: A pseudo-repetition effect for words previously expected but not presented. *NeuroImage* 183: 263-272.

Thornhill, D. E. & C. Van Petten, 2012. Lexical versus conceptual specificity of two ERP components elicited by plausible but unpredictable sentence completions. *International Journal of Psychophysiology* 83: 382-392.

Van Berkum, J. J., A. C. Brown, P. Zwitserlood, V. Kooijman & P. Hagoort. 2005. Anticipating upcoming words in discourse: Evidence from ERPs and reading times. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 31: 443-467.

Van Petten, C. & B. Luka, 2012. Prediction during language comprehension: Benefits, costs, and ERP components.

International Journal of Psychophysiology 83: 176-190.

Wen, Z. A. Biedroń & P. Skehan. 2017. Foreign language aptitude theory: Yesterday, today and tomorrow. *Language Teaching* 50:1-31

Wicha, N., E. Moreno & M. Kutas, 2004. Anticipating words and their gender: An event related brain potential study of semantic integration, gender expectancy, and gender agreement in Spanish sentence reading. *Journal of Cognitive Neuroscience* 16: 1272-1288.

Wen, Zhisheng (温植胜). 2005. Foreign language aptitude revisited. *Modern Foreign Languages* (4): 383-392. [2005，对外语学能研究的重新思考.《现代外语》第 4 期:383-392.]

收稿日期： 作者修改稿: 本刊修订:

通讯作者：岳金星<yuejinxing@hit.edu.cn>

150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街92号 哈尔滨工业大学认知与社会神经科学实验室

Corresponding author: Jinxing Yue, Laboratory for Cognitive and Social Neuroscience, Harbin Institute of Technology, 92 West Dazhi Str., Nangang District, Harbin 150001, P. R. China